第 64 卷 第 4 期 天 文 学 报 Vol. 64 No. 4
2023 年 7 月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Jul., 2023

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2023.04.006

超导SIS混频器空间应用发射锁定机构热胀特性测量研究*

张碧澄[1,2] 林镇辉[1] 姚骑均[1†]

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)
(2 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

摘要 高灵敏度太赫兹探测模块(High Sensitivity Terahertz Detection Module, HSTDM)是中国空间巡天望远镜—巡天光学设施的后端模块之一, 其核心探测器采用可工作于10 K温区的氮化铌超导SIS (Superconductor Insulator Superconductor)混频器. 超导SIS混频前端的锁定机构在力学和热学方面需相应的特殊设计, 以应对发射阶段的力学振动以及工作运行阶段的隔热要求. 为了确认在80 K温区锁定机构与混频器前端有效分离, 针对超导SIS混频前端发射锁定机构所用特氟龙材料热胀特性, 开展基于低温LVDT (Linear Variable Differential Transformer)测量和标记划痕法测量以及两种测量方法交叉验证. LVDT实验测量结果表明特氟龙材料收缩率随温度变化与理论模型基本一致, 在80 K测得材料收缩率为1.86%. 据此分析, 超导SIS混频前端锁定机构在80 K温度下可与10 K冷级的超导SIS混频前端实现有效分离.

关键词 空间飞行器: 仪器, 技术: 低温杜瓦, 材料热胀特性
中图分类号: P111; **文献标识码**: A

1 引言

太赫兹波段介于传统射电波段和光学/红外波段之间, 是研究天体物理学的重要观测波段[1]. 近几年来, 太赫兹频段一系列重要的观测发现冲击了天文学界各个层次的研究. 相比于地面观测设备, 空间太赫兹观测消除了地球大气对目标观测信号的吸收以及地球大气辐射噪声影响, 为太赫兹天文观测打开了新的频率窗口, 大大提高了对微弱天体的探测能力. 为此, 从2015年起中国科学院紫金山天文台与中国工程物理研究院电子工程研究所合作, 为载人空间站巡天望远镜研制其中后端载荷—高灵敏度太赫兹探测模块(High Sensitivity Terahertz Detection Module, HSTDM), 将开展分子云的形成和演化、宇宙碳演化及0.41–0.51 THz 频段谱线巡测等空间太赫兹天文观测研究, 填补我国空间太赫兹天文观测的空白[1].

在高灵敏度太赫兹探测模块中, 其核心的接收机组件采用了工作于10 K温区的氮化铌超导SIS (Superconductor Insulator Superconductor)混频器, 以实现分子谱线的超高灵敏度探测. 通常, 地面天文观测用太赫兹频段超导SIS混频器直接固定在4 K制冷平台上, 以获得尽量低的工作温度. 而高灵敏度太赫兹模块接收机因受到模块单机功耗和

2022-05-09收到原稿, 2022-08-16收到修改稿
*国家自然科学基金项目(11873101)资助
†qjyao@pmo.ac.cn
[1]史生才, 李婧, 姚骑均, 等. 高灵敏度太赫兹探测模块方案研制报告. 2019, 内部文件

体积的限制, 所采用的小型制冷机仅能提供有限的制冷功率, 故需对超导SIS混频器芯片材料临界温度以及混频前端结构等热学特性设计提出特殊要求, 以适应在10 K温区的高灵敏探测. 同时考虑模块发射阶段的力学条件, 对超导SIS混频前端结构安装也提出了特殊需求. 一方面要保证在发射阶段避免振动对超导SIS混频前端造成损害, 另一方面在运行阶段杜瓦从常温(300 K)降至低温(80 K)后, 处于10 K冷级的超导SIS混频前端需与80 K冷级的发射锁定机构有效分离从而提高10 K温区的制冷效率.

锁定机构在航空航天中的应用很常见, 例如火箭级间连接分离机构使用了爆炸螺栓. 此外, 文献[2]中使用聚乙烯(高强度, 低熔点)线结合弹簧机构锁定望远镜镜面, 升空后通过加热烧断聚乙烯线, 利用弹簧机构松开固定镜面的钩子, 使镜面可以自由转动.

本文研究的超导SIS混频前端发射锁定机构使用了高分子材料特氟龙, 以确保发射阶段超导SIS混频前端免受振动损坏. 同时利用特氟龙材料的热胀冷缩特性, 当SIS接收机制冷到80 K温度后, 实现锁定机构与超导SIS混频前端的自动热隔离. 锁定机构设计如图1所示. 该设计具有结构简单紧凑, 可靠性高的特点. 超导SIS混频前端锁定机构由x、y、z三维方向上的特氟龙块组成, 特氟龙块一端用螺丝固定到80 K支撑框架. 固定的螺丝对特氟龙材料的压力也会引起其弹性变形, 使得特氟龙块在80 K无法与超导SIS混频前端真正脱离. 为此, 在设计时, 根据螺丝的扭矩、特氟龙的杨氏模量[3–5]可导出x、y、z方向上所采用的特氟龙块受到螺丝的应力分别产生49 μm的形变. 而文献[6]中对整个杜瓦结构受到的重力影响进行仿真, 得到整个混频前端基座在z方向会产生41 μm的向下形变. 综合考虑加工和安装误差等因素, 要求所采用的特氟龙材料在80 K工作温区三维方向收缩量大于90 μm才可满足设计要求. 尽管在文献[7]中, 给出了特氟龙材料从常温293 K至低温4 K的收缩率理论模型曲线, 但特氟龙材料会因品牌、型号和批次不一致而造成特氟龙材料热胀特性的差异, 因此在航天应用中, 对具体使用的特氟龙材料热胀特性必须要有详细的了解.

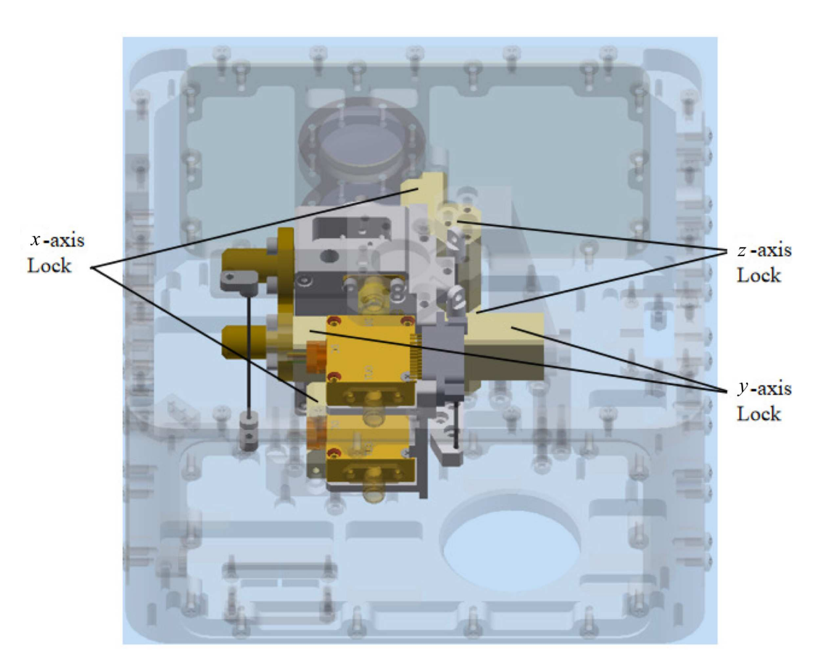


图 1 超导混频前端发射锁定机构

Fig. 1 Launch lock mechanism of SIS mixer front-end

文献[6]中已对包括接收机组件在内的模块整机开展了详细力学特性分析, 本文利用低温线性可变差动变压器(Linear Variable Differential Transformer, LVDT) 测量和标记划痕法, 对超导SIS混频前端发射锁定机构使用的特氟龙材料开展热胀特性测量研究, 并对测量结果进行了讨论与分析.

2 基于LVDT的材料热胀特性测量

2.1 LVDT工作原理

LVDT主要由铁芯、初级线圈、次级线圈组成(如图2所示). 初级线圈、次级线圈分布在线圈骨架上, 线圈内部有一个可自由移动的杆状铁芯. 当铁芯处于中间位置时, 初级线圈中所加的激励信号在两个次级线圈产生的感应电动势相等, 输出电压为零; 当铁芯在线圈内部移动并偏离中心位置时, 两个线圈产生不等的感应电动势, 输出电压取决于偏离中心的位移量大小. 由于LVDT将位移导致的磁通量的变化成比例地转化为电信号, 移动部件(探头或铁芯杆组件)与变压器之间仅通过电磁耦合, 无需内置额外电子电路即可工作, 因此LVDT被广泛用于需具备较长使用寿命和较高可靠性特点的军事和航空航天等领域[8].

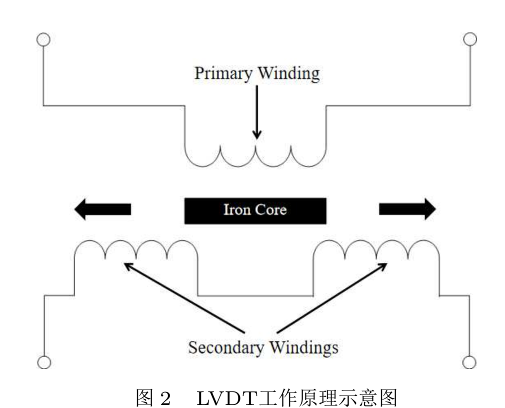


图 2 LVDT工作原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of working principle of LVDT

2.2 基于LVDT的材料热胀特性测量实验

基于LVDT的材料热胀特性测量系统如图3所示, 包含LVDT测试工装, 基于AD598的LVDT读出电路及供电电源, 输出结果则采用高精度电压表读出. 待测中空特氟龙材料置于LVDT测试工装左侧, 铁芯置于中间, 右侧放置回位弹簧. 随着环境温度的下降, 特氟龙材料产生收缩, 右侧弹簧顶住LVDT向左移动, 由于中间铁芯固定不动, LVDT将与铁芯产生相对位移, 从而输出的电压发生变化. 在LVDT材料热胀特性测量系统中, 采用了TE (Tyco Electronics)公司的E系列经济型LVDT传感器E-100[2], 该LVDT传感器在其量程(2.54 mm)范围内的线性度为±0.5%. 而AD598芯片[3]为专用LVDT信号调理器, 对LVDT传感器输出信号无恒定幅度和恒定频率要求, 大大降低测量系统复杂度, 以较高精度实现LVDT传感器机械位置与电压的线性转换输出[9]. 为了验证LVDT在低温(4 K)下能否保持良好的线性度, 对其进行了标定实验[10].

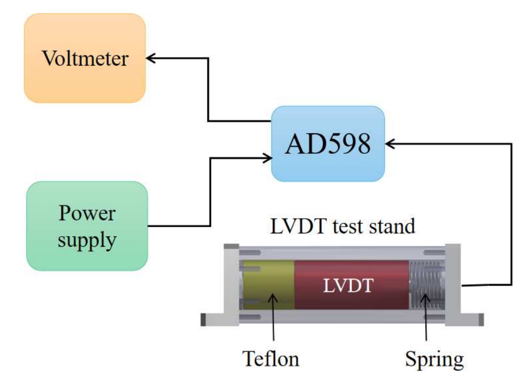


图 3 基于LVDT法的材料热胀特性测量系统框图

Fig. 3 System diagram for measuring the materials' thermal expansion characteristics using LVDT method

2.2.1 不同温区下LVDT线性度实验

在测量材料热胀特性之前, 首先需标定测量系统输出电压与LVDT中铁芯相对位移的关系. 为此在室温下, 我们首先将图3中LVDT测试工装中左侧待测特氟龙材料替换为弹簧. 右侧弹簧取出, 用定标微分头顶住LVDT. 为了减少微分头和LVDT之间的摩擦, 将一颗玻璃珠置于微分头和LVDT之间. 通过等间距地旋转微分头, 获取LVDT铁芯相对位移与输出电压之间关系. 室温下LVDT标定如图4所

[2] https://www.te.com.cn/chn-zh/product-02560541-000.html

[3] https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD598.pdf

示, 左图是实测图, 右图为LVDT测试工装剖面图. 在该测量系统标定时, 每隔0.05 mm读取AD598芯片输出电压, 通过对读取的电压数据求平均值以减少读出电压误差. 利用Python软件拟合相对位移量与对应输出电压数据, 获得相对位移量与输出电压的关系式为

$$U = (1.788 \pm 1 \times 10^{-3})i + (2.179 \pm 1 \times 10^{-3}) , \quad (1)$$

式中U为输出电压, 单位为V; i为LVDT与铁芯相对位移, 单位为mm. (1)式给出了拟合参数的同时也给出了拟合参数的标准差. 利用测微头校准结果计算[11–12]得到的非线性偏差为±0.26%, 与数据手册上提供的±0.5%一致.

同样, 在77 K和4 K低温下测量了LVDT的非线性误差, 以实测值与理论模型比较, 计算77 K和4 K温区下LVDT的非线性偏差分别为±0.62%和±0.88%, 略大于E-100传感器工作温区内±0.5%的范围. 可见随着温度降低, LVDT的非线性偏差增大. 这是由于低温下, 铁芯磁导率和LVDT的灵敏度降低, 初级线圈和次级线圈之间的耦合显著减少导致的[10, 13]. 通过计算, 77 K低温下LVDT的非线性偏差导致每收缩1 mm带来的位移误差为50 μm.

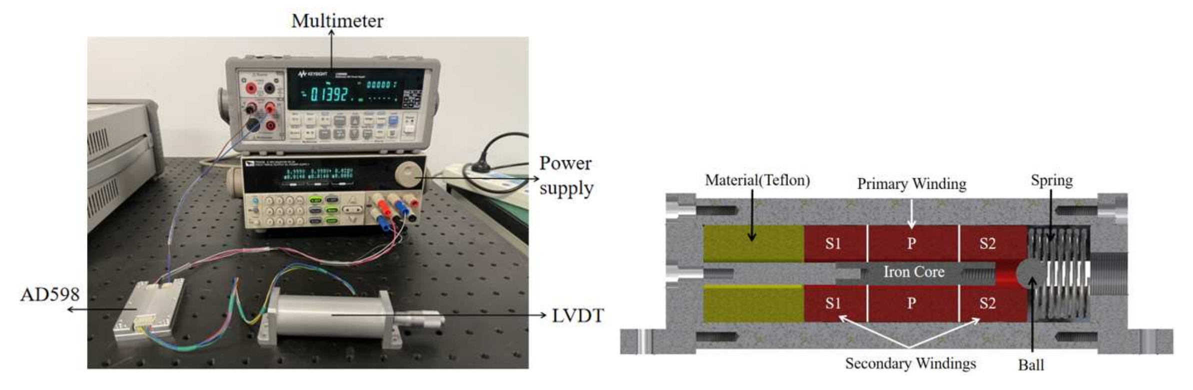


图 4 LVDT标定示意图

Fig. 4 Schematic diagram of LVDT calibration

2.2.2 材料热胀特性实验

完成测量系统标定后, 恢复实验装置, 并将LVDT测试台置于4 K杜瓦制冷平台, 进行降温和升温的材料热胀特性测量. 特氟龙材料热胀特性测量实验照片如图5所示, LVDT固定在杜瓦冷板上, 通过数据传输线与外部仪器连接. 在降温和升温过程中, 读取制冷平台冷板温度以及测量系统输出的电压, 从而计算特氟龙材料收缩率随温度的变化关系. 低温下, 图3里LVDT测试工装中固定铁芯的铝合金杆同样会收缩. 为了修正这一影响, 将材料替换为低收缩率的殷钢进行从室温到4 K的LVDT修正测试. 通过获取两次测试的结果, 进行相应的数据处理, 增加测试结果的准确度.

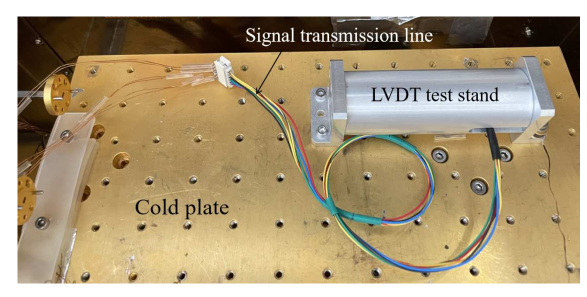


图 5 特氟龙材料热胀特性测量实验照片

Fig. 5 Photo of the experiment on thermal expansion characteristics of Teflon

2.3 实验测量结果及分析

分别记录杜瓦降温和升温过程中LVDT输出电压和冷板温度, 并通过(1)式的标定结果, 计算降温和升温过程特氟龙材料的尺寸变化. 在计算特氟

龙材料尺寸变化时, 需要考虑外壳、铁芯连接的合金铝等长度随温度变化产生收缩和膨胀对测量输出电压的影响. 经基于殷钢的收缩实验修正后, 特氟龙的长度尺寸随温度变化关系如图6所示. 从图6中可知, 温度从室温降至4 K特氟龙长度缩短了394 μm; 升温过程特氟龙尺寸则反向变化. 从降温和升温过程所测量的特氟龙材料的尺寸变化数据并不一致, 主要原因是降温和升温过程读取的是冷板上的温度, 而特氟龙材料由于与冷板之间存在热阻[14], 材料的实际温度变化滞后于冷板温度变化, 同时, 由于LVDT线圈激励功率的加热效应, 实际待测特氟龙材料上的温度与冷板也会有一定差异. 降温和升温过程测量结果很好体现了冷板和特氟龙材料之间的温度变化滞后效应导致特氟龙材料尺寸变化的差异.

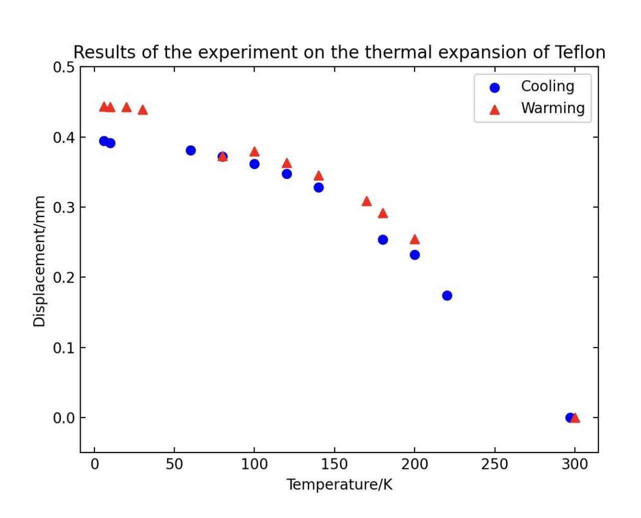


图 6　特氟龙材料尺寸随环境温度变化关系

Fig. 6　Size of Teflon material changed with the ambient temperature

根据图6的测量结果, 计算特氟龙材料的收缩率随温度变化关系如下式所示:

$$S(T)=\frac{L_T-L_{293}}{L_{293}}\,, \tag{2}$$

式中$S(T)$为材料在温度T时的收缩率, L_T是在温度T时材料的长度, L_{293}是材料在室温293 K时的长度. 采用(2)式计算特氟龙材料收缩率结果如图7所示.

Marquardt等人总结了4–300 K材料的收缩率随温度变化理论模型[7], 该理论模型的方程为

$$S(T)=(a_0+a_1T+a_2T^2+a_3T^3+a_4T^4)\times10^{-5}\,. \tag{3}$$

特氟龙材料的综合线性热膨胀系数[7]a_0、a_1、a_2、a_3和a_4分别为-2.165×10^3、3.278、-8.218×10^{-3}、7.244×10^{-5}和0. 从图7中可发现, 特氟龙材料从300 K至4 K的降温以及反向升温过程所测量的材料收缩率分布在(3)式方程曲线两侧, 温度变化趋势与(3)式曲线一致. 由于特氟龙材料存在热阻和热容, 导致在升温或降温过程中特氟龙材料实际温度变化滞后于杜瓦冷板温度, 使得降温过程中特氟龙材料实际温度高于杜瓦冷板温度, 而升温过程中低于杜瓦冷板温度, 表现为材料收缩率随温度变化分布在理论曲线的两侧. 若降温和升温过程中进行温度稳定控制, 特氟龙材料实际温度与杜瓦冷板温度滞后效应可进一步减小, 测量结果与(3)式的理论模型将更为吻合.

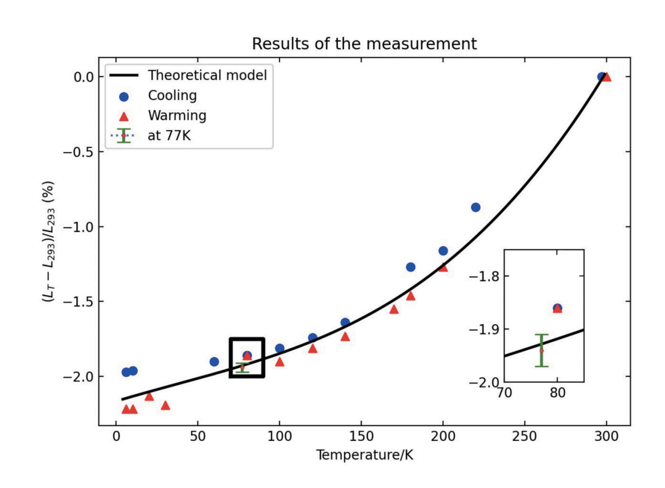


图 7　特氟龙材料收缩率随温度变化实测结果与理论模型比较

Fig. 7　Comparison between measured results and the theoretical model of the thermal expansion characteristics of Teflon varying with temperature

为了验证温度滞后效应以及材料热阻对测量结果的影响以及获取特氟龙材料在80 K温度下准确的收缩率(特氟龙材料作为超导SIS混频前端发射锁定机构, 期望在80 K温度下与超导SIS混

频前端有效分离), 将材料热学特性测量系统中的LVDT测试工装充分浸泡在77 K的液氮中, 以使特氟龙材料温度保持在77 K且温度分布均匀. 在该温度下测得3组材料收缩率, 分别为1.93%、1.98%和1.92%, 均值为1.94%. 该测量结果的均值及测量误差在图7中局部放大的子图中给出. 从图7中可知, 特氟龙材料在77 K的收缩率与理论模型吻合(理论模型为1.93%). 相比于在4 K杜瓦中降温和升温过程中测量特氟龙材料收缩率(实测均为1.86%, 理论模型为1.92%), 特氟龙材料直接浸泡在液氮中, 其均匀温度分布有效消除了温度梯度效应带来的影响, 因此获得与理论模型更为一致的结果.

超导SIS混频前端发射锁定机构所用的特氟龙材料设计尺寸在常温x、y、z三维方向长度分别为28.5 mm、30 mm和25 mm[4], 均紧固在80 K冷级. 当工作温度下降至80 K时, 超导SIS混频前端发射锁定机构产生收缩. 以特氟龙材料在80 K的收缩率测量结果分析, 超导SIS混频前端在三维方向与80 K冷级将分别产生(530±27) μm、(558±28) μm、和(465±23) μm的缝隙, 远大于在三维方向上需要保留的90 μm空隙. 由此可见, 三维方向均可与80 K冷级有效分离, 使得超导SIS混频前端与80 K冷级之间热传导隔离, 可确保超导SIS混频前端在10 K工作温区持续正常工作.

3 基于标记划痕法的材料热胀特性测量

3.1 标记划痕法工作原理

标记划痕法测量材料收缩率主要是根据杠杆原理, 将待测材料固定于杠杆支点一侧端点, 若待测材料因温度变化产生尺寸变化, 将带动与之固定一侧杠杆移动, 而杠杆支点另一侧将反向移动. 若测量反向一侧移动轨迹的长度, 根据支点两侧杠杆长度可计算得到待测材料变化尺寸, 从而获得材料的收缩率. 标记划痕法测量材料收缩率工作原理如图8所示, 待测材料固定在杠杆左侧, 距离支点O长度为b, 杠杆另一侧距离支点长度为a, 当待测材料尺寸收缩带动杠杆左侧向下移动距离为h(材料收缩尺寸), 杠杆移动角度为α, 杠杆另一侧端点移动轨迹(划痕)长度为l, 则材料收缩尺寸h为

$$h = b\sin(\alpha) = b\sin\left(\frac{l}{a}\right) . \qquad (4)$$

由于材料的收缩长度很小, 将会导致杠杆倾斜的角度α为小量, 此刻$\sin(\alpha) \sim \alpha$. 若选取合适b, 且选取a远大于b, 则可以放大杠杆另一侧端点移动轨迹(划痕)长度, 则l与材料收缩尺寸h关系可近似为

$$l \sim \frac{a}{b}h . \qquad (5)$$

可见当$\frac{a}{b}$比值远大于1时, 则支点另一侧移动轨迹(划痕)长度l将对材料变化尺寸h进行有效放大, 从而可实现材料收缩率的高精度测量. 标记划痕法仅依靠杠杆移动轨迹(划痕)和杠杆原理测量材料收缩率, 无需增加外围电子学部件, 大大简化了测量系统. 因此, 标记划痕法特别适合如极低温密闭、独立环境下的材料热胀特性测量.

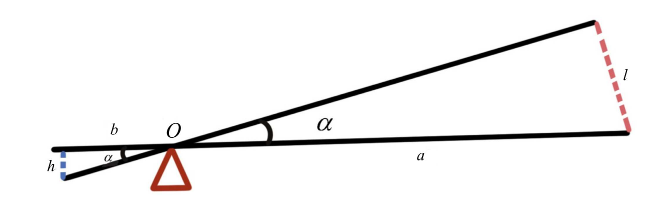


图 8 标记划痕法的材料热胀特性测量原理示意图

Fig. 8 Measurement principle of the thermal expansion characteristics of material using marking scratch method

3.2 基于标记划痕法的材料热胀特性测量实验

利用标记划痕法开展特氟龙材料热胀特性测量实验, 测量系统如图9所示. 杠杆采用不锈钢材料薄片, 其一侧末端弯折并削尖, 以便在镀金件上表面移动时刻划出清晰的痕迹. 杠杆支点通过销钉固定在铝制支撑架上且可灵活转动. 杠杆另一侧末端也通过销钉固定在特氟龙材料一侧, 特氟龙材料的底部固定在铝制支撑架上. 为了使杠杆另一侧划出痕迹足够明显, 选取杠杆一侧(固定在特氟龙材料上)离支点长度为5 mm, 另一侧离支点长度为50 mm, 据(5)式中$\frac{a}{b}$计算放大倍率为10, 特氟龙

[4]张坤, 刘冬, 史生才, 等. 载人空间站巡天光学设施高灵敏度太赫兹探测模块初样设计报告. 2021, 内部文件

材料高度为25 mm, 杠杆待测端下降高度应取决于材料定位销孔以下部分(21.5 mm)的收缩长度. 将该测量装置放于4 K杜瓦冷板上进行制冷降温. 由于标记划痕法测量系统密闭在4 K杜瓦里, 与外部无任何连接, 因此无法获取划痕轨迹长度随温度的变化关系.

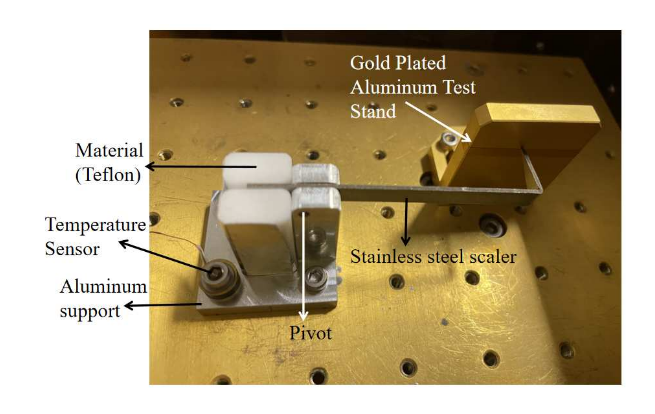


图 9 标记划痕法测量特氟龙材料热学特性照片

Fig. 9 Photo of thermal properties of Teflon material measured by marking scratch method

3.3 实验测量结果及分析

随着冷板温度下降, 特氟龙材料尺寸发生变化, 带动同侧杠杆移动, 杠杆另一侧尖梢反向移动, 并在镀金件表面划出移动痕迹, 至4 K温度时划出痕迹最长. 当4 K杜瓦升温时, 杠杆尖梢反向移动. 经过降温和升温过程, 尖稍在镀金件划出往返移动痕迹, 移动划痕在测量显微镜下测得痕迹长度在2.887–3.122 mm之间, 测量的划痕如图10所示. 将镀金铝立板安装在杜瓦上时, 与不锈钢杠杆的尖稍有多处摩擦, 如图10中的下方水平划痕所示, 该区域是杠杆起点的误差范围. 标记划痕法实验时杠杆运动有两个状态: 其一是静止状态下, 杠杆的移动需要克服最大静摩擦力; 其二是杠杆滑动时需要克服动摩擦力. 如图9所示, 杠杆垂直于立板滑动, 不锈钢杠杆和镀金立板之间的摩擦力与不锈钢杠杆对镀金立板的压力有关. 不锈钢杠杆与镀金铝立板之间的实测预压力为1 N, 而不锈钢杠杆与镀金铝立板之间的静摩擦系数为0.61[5], 最大静摩擦力为0.61 N; 滑动时, 不锈钢与铝之间的动摩擦系数为0.3[15], 动摩擦力为0.3 N. 根据特氟龙的杨氏模量为0.564 Gpa[6]以及实验的特氟龙尺寸(长为21.5 mm, 截面为178 mm^2), 计算特氟龙材料尺寸变化时每收缩1 μm产生4 N的应力. 依据上一节LVDT的测试结果, 特氟龙材料收缩长度在423–475 μm之间, 对应材料收缩产生的应力在1692–1900 N. 利用杠杆力矩关系, 在镀金立板端产生的应力缩小为原来的1/10, 即169.2–190 N. 应力仍远大于摩擦力, 可见杠杆在镀金立板上滑动受摩擦力的影响可忽略不计. 此外, 不锈钢的杨氏模量为193 Gpa[7], 最大摩擦力(0.61 N)对不锈钢造成的形状变化为3.2×10^{-6}, 不锈钢的形变量十分微小, 对实验结果影响也可忽略不计. 由此可见, 试验测得的划痕长度真实有效.

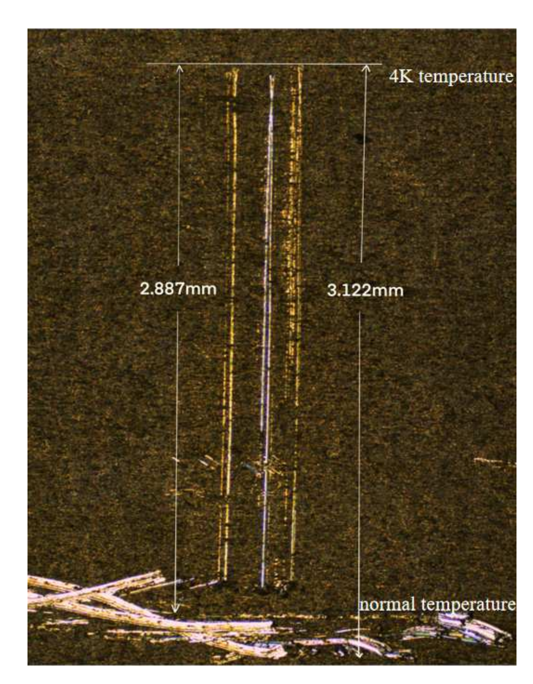


图 10 在测量显微镜下测量的划痕

Fig. 10 The scratches that are measured under the measuring microscope

为了准确计算出4 K温度时特氟龙材料收缩

[5]https://www.engineersedge.com/coeffients_of_friction.htm
[6]https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=4d14eac958e5401a8fd152e1261b6843
[7]https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=965

率, 需要对包含铝制支撑架收缩影响在内的测量结果进行分析和校正. 误差分析如图11所示, 以水平指针为X轴, 杠杆支点O为原点建立坐标系. 理想情况下, 除测试材料外其余支撑结构不收缩, 指针倾斜(图中的倾斜黑线所示)角度设为α; 实际上铝制支撑架随温度下降也发生收缩, 支点位置随之发生变动, 设支点收缩到如图11中的C点; 假设降温过程材料收缩后, 充当杠杆的指针与X轴交于A点; 假设降温过程材料收缩至B点; 倾斜红线为实际上指针的倾斜轨迹, 其倾斜角度设为β. 以支点收缩的长度n, 显微镜下测量的最终痕迹长度m, 则可建立二元一次方程组为

$$\begin{cases} \cos(\alpha-\beta) = \dfrac{b^2+b^2-n^2}{2b^2}\,, \\ \cos\beta = \dfrac{(a-\frac{n}{\sin\beta})^2+(c-\frac{n}{\tan\beta})^2-m^2}{2\times(a-\frac{n}{\sin\beta})\times(c-\frac{n}{\tan\beta})}\,, \end{cases} \tag{6}$$

化简后为

$$\begin{cases} \alpha-\beta = \arccos\left(\dfrac{2b^2-n^2}{2b^2}\right)\,, \\ n\cdot\sin\beta + c\cdot\cos\beta = \dfrac{n^2+a^2+c^2-m^2}{2a}\,, \end{cases} \tag{7}$$

式中n为26.5 mm的铝制支撑架支点在4 K下的收缩长度, 据文献[16]铝在4 K温度下的收缩率计算得到的值为0.11 mm; m是测量划痕的长度, 在2.887–3.122 mm之间, 由于低温下镀金铝立板也会收缩, 修正后划痕的有效长度为2.875–3.109 mm; 杠杆支点左侧的杠杆长度, 即b为5 mm; 室温下支点右侧杠杆的长度, 即a为50 mm; 计算可得杜瓦制冷到4 K温度时支点右侧指针收缩后的长度c为49.852 mm. 用Matlab求解上述二元一次方程组, 得到最后的材料收缩率在1.92%–2.02%之间. 而根据(3)式计算在4 K时特氟龙的收缩率为2.14%. 校准后的测量结果与理论模型计算结果基本一致, 表明标记划痕法在低温环境下测量材料收缩率的可行性和准确性.

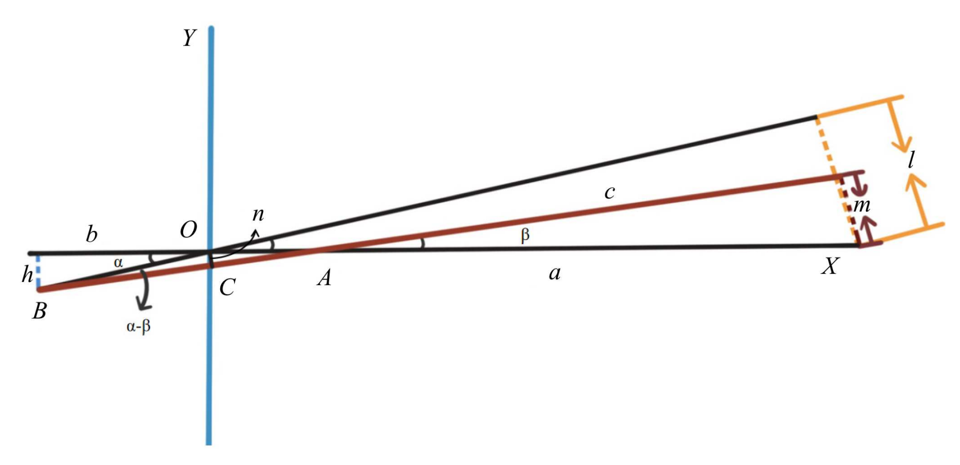


图 11 划痕轨迹误差分析图

Fig. 11 Error analysis diagram of scratch track

4 总结

本文针对高灵敏度太赫兹探测模块超导SIS混频前端发射锁定机构所用特氟龙材料的热胀特性开展测量实验研究, 采用了基于LVDT位移传感器和物理标记划痕法两种方法分别进行特氟龙材料热胀特性的实验测量. 在基于LVDT法测量方面, 测量特氟龙材料从300 K至4 K的降温和升温过程的材料热胀特性随温度的变化, 得到的特氟龙材料热胀特性随温度变化关系与理论模型基本一致. 降温和升温过程的测量结果分布在理论模型曲线两

侧, 主要原因在于实验读取的温度为4 K杜瓦冷板温度, 而实际特氟龙材料与冷板存在热阻, 导致两者之间存在温度梯度. 将特氟龙材料完全浸泡在液氮中测试, 所获得的测量结果与理论模型更为一致, 可预见在实验降温和升温过程若通过冷板控温和长时间稳定后测量, 可获得更真实的特氟龙材料温度, 使得测量结果与理论模型更为吻合.

将LVDT测试工装置于冷板上, 测得在80 K温度下特氟龙材料收缩率为1.86%, 依此推断, 作为超导SIS混频前端发射锁定的特氟龙材料可以在常温x、y、z三维方向实现锁定, 并且当工作温度下降至80 K时, 特氟龙材料产生的收缩量足以与超导SIS混频前端分离, 使得超导SIS混频前端与80 K冷级热隔离, 确保超导SIS在10 K 温区下工作.

标记划痕法测得特氟龙材料在4 K下的收缩率在1.92%–2.02%之间, 与理论模型的2.14%基本一致, 表明标记划痕法在极低温独立环境下测量材料收缩率的正确性和可行性.

在杜瓦中采用LVDT测量材料热胀特性, 由于材料本身有热阻, 所以存在待测材料的温度滞后于冷板温度问题, 影响材料热胀特性随温度变化关系结果, 将在后续实验测量时加以改进, 比如增加待测材料与冷板的接触面或更改温度监测点等. 另一方面, 测量系统所采用支撑工装存在随温度变化的收缩或膨胀的热学特性, 因此在测量系统所选取支撑固件的收缩率应尽可能小于待测材料的收缩率以减小支撑固件对测量精度影响. 通过系统校正支撑工装的材料收缩率影响, 有助于减小其引入的测量误差. 相比LVDT测量, 标记划痕法没有了额外的电子学部件连接, 大大简化系统的复杂度, 但是标记划痕法测量结果受测量系统本身结构影响因素更多, 包括系统支撑材料热学特性、杠杆材料刚度与弹性、杠杆与镀金表面接触定位精度等, 需要更精细的结构设计和安装定位等. 此外, 由于标记划痕法测量系统相对独立, 与外部无任何连接, 因此无法如LVDT传感器测量材料收缩率随温度变化.

参考文献

[1] Phillips T G, Keene J. Proceedings of the IEEE, 1992, 80: 1662

[2] Jayakumar S. Design and Analysis of Launch Locks for JUICE Sub-Millimeter Wave Instrument. Lule: Lule University of Technology, 2014: 38-39

[3] Yu Q M, Yang X J, Zhou H L. Advances in Mechanical Engineering, 2018: 10

[4] Bickford J H. Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints: Non-Gasketed Joints. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2007: 30-160

[5] Bickford J H, Nassar S. Handbook of Bolts and Bolted Joints. New York: Marcel Dekker, 1998: 309-631

[6] 张坤, 姚骑均, 刘冬, 等. 天文学报, 2023, 64: 3

[7] Marquardt E D, Le J P, Radebaugh R. Cryogenic Material Properties Database. Proceedings of the 11th International Cryocooler Conference. Keystone, 2000

[8] Drumea A, Vasile A, Comes M, et al. Proceedings of the 1st Electronic Systemintegration Technology Conference. Dresden: IEEE, 2006: 629

[9] 周玉涛, 盛镔, 朱国力, 等. 电子技术应用, 1998, 24: 63

[10] McDonald P C, Iosifescu C. MeScT, 1998, 9: 563

[11] 吴启民. 航空测试技术, 1980, 2: 1

[12] 郭辉辉. 新型MEMS和NEMS有机气体传感器的研究. 成都: 西南交通大学, 2013: 42-43

[13] Ackermann F W, Klawitter W A, Drautman J J. Magnetic Properties of Commercial Soft Magnetic Alloys at Cryogenic Temperatures//Timmerhaus K D. Advances in Cryogenic Engineering. Boston: Springer, 1971: 46-50

[14] Choi Y S, Dong L K. Cryo, 2012, 52: 465

[15] Deulin E A, Mikhailov V P, Panfilov Y V, et al. Mechanics and Physics of Precise Vacuum Mechanisms. Dordrecht: Springer, 2010: 33-34

[16] Corruccini R J, Gniewek J J. Thermal Expansion of Technical Solids at Low Temperatures: A Compilation from the Literature: NBS Monograph 29. Washington: National Bureau of Standards, 1961

Research on Thermal Expansion Characteristics Measurement of Launch Lock Mechanism for SIS Mixer's Space Application

ZHANG Bi-cheng[1,2] LIN Zhen-hui[1] YAO Qi-jun[1]
(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)
(2 School of Astronomy and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract The High Sensitivity Terahertz Detection Module (HSTDM) is one of the scientific payloads of the China Space Survey Telescope. The core of the HSTDM is the NbN superconducting tunnel junction SIS (Superconductor Insulator Superconductor) mixer, operating at temperature 10 K. The installation structure of the superconducting SIS mixer needs to be specially designed to cope with the mechanical vibration during the launch phase and the thermal insulation requirements during the operation phase. Material thermal expansion characteristics investigation based on the low-temperature LVDT (Linear Variable Differential Transformer) measurement and marking scratch measurement were carried out to confirm the design validity of the thermal expansion locking mechanism. The two methods are cross-verified. The LVDT experimental measurement results show that the shrinkage rate of Teflon material changes with temperature and meets the theoretical model. At the same time, we verified the LVDT results with the marking scratch method. Consistently, the shrinkage rate of the material is 1.86% at 80 K, so the Teflon front-end locking mechanism of the superconducting SIS mixer can achieve effective separation.

Key words space vehicles: instruments, technology: cryostat, material thermal expansion